

Рис. 6. Графики зависимостей соотношений массы углерода к массе железа по двум механизмам в зависимости от радиуса частиц железной руды

### Список использованных источников

1. Цымбал В.П. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, И.А. Рыбенко и [др.]. – М: «Металлургиздат», 2014. – 488 с.
2. Сеченов, П.А. Моделирование сложных металлургических систем с использованием диссипативных структур и системной динамики / П.А. Сеченов, В.П. Цымбал // В сборнике: Металлургия: технологии, инновации, качество. – Новокузнецк, 2017. – С. 85-90.
3. Kroese D.P., Taimre T., Botev Z.I. Handbook of Monte Carlo Methods. Wiley, 2011. – 743 p.
4. Kroese, D.P.; Brereton T.; Taimre T.; Botev Z. I. Why the Monte Carlo method is so important today. WIREs Comput Stat 6, 2014. – 386 – 392 pp.
5. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.

УДК 669.16.228.001.57

**Е. Д. Солнцева, Н. Б. Лошкарев**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## РАЗРАБОТКА ГОРЕЛКИ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ДЛИНОЙ ФАКЕЛА ДЛЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

### Аннотация

*При обжиге материалов во вращающихся печах важную роль играют процессы горения топлива. В данной работе представлена краткая информация о конструкции и принципе работы горелки с комбинированной системой сжигания топлива, которая была разработана*

специально для новой вращающейся печи обжига шамота. А также описаны этапы и приведены результаты, компьютерного моделирования процесса горения природного газа, выполненного в программном комплексе ANSYS.

**Ключевые слова:** горелка, комбинированная система сжигания топлива, вращающиеся печи, обжиг шамота, горение, топливо, компьютерное моделирование.

#### **Abstract**

*When firing materials in rotary kilns, an important role is played by the processes of fuel combustion. This paper presents a brief information on the design and principle of operation of the burner with a combined fuel combustion system, which was developed specifically for the new rotary chamotte kiln. The stages are also described and the results of computer simulation of the combustion process of natural gas performed in the ANSYS software package are presented.*

**Key words:** burner, combined fuel combustion system, rotary kilns, chamotte roasting, combustion, fuel, oxidizer, computer simulation.

В огнеупорной промышленности вращающиеся печи получили широкое распространение благодаря высокой производительности и механизации. Эффективность их работы напрямую зависит от того, насколько грамотно организован процесс сжигания топлива. Чтобы добиться качественной тепловой обработки материалов, необходимо обеспечить оптимальное распределение температур по длине печи. Это становится возможным благодаря применению современных топливосжигающих устройств, конструкция которых позволяет получить факел необходимых параметров в соответствии с технологическим процессом и условиями работы агрегата.

Для проведения качественного обжига шамота в новой вращающейся печи «Боровичского комбината огнеупоров» возникла потребность разработать такое горелочное устройство, которое позволило бы увести максимальное тепловыделение от зоны выгрузки на 18-20 м. Таким образом будет достигнута максимальная температура обжигаемого материала в зоне спекания и относительно невысокая температура в зоне выдержки и на выходе из печи.

Инженерами ООО НПФ «Горелочный центр» была разработана горелка с комбинированной системой сжигания топлива (рис. 1). Общая идея конструкции горелок с длиной факела порядка 15 м, состоит в том, что основная струя газа, примерно 80 % общего расхода, подается по центральному соплу с высокой скоростью, примерно 250...270 м/с. Это позволяет оторвать факел от сопла горелки и заставить его начать горение в том месте, где в струю будет подсосано достаточное количество воздуха из холодильника, а скорость струи снизится. При этом рабочее пространство печи должно быть разогрето до температуры  $\approx 800$  °С. Окислитель в струю не подается. Вокруг центральной струи создается кольцо из защитной атмосферы, путем сжигания в этом кольце газа с коэффициентом избытка воздуха меньше единицы (0,75). В этом случае около 20 % топлива от общего количества, и первичный воздух, подаются в камеру смешения на торце горелки, где организовано их хорошее перемешивание. Таким образом, создаются условия, при которых, вторичный воздух, идущий из холодильника, не попадает в центральную газовую струю, а значит горение основного газа, до определенного момента, не происходит.

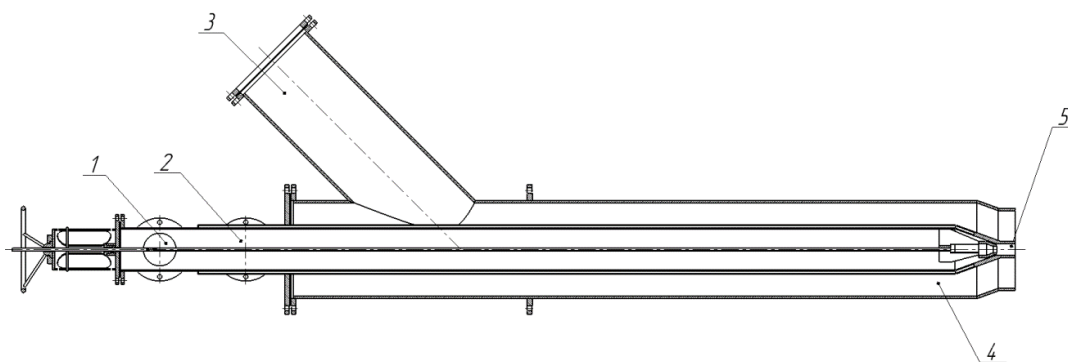


Рис. 1. Эскиз горелки: 1 – подвод основного газа; 2 – подвод газа для кольцевого защитного факела; 3 – подвод первичного воздуха; 4 – смесительная камера; 5 – центральное сопло основного газа

Длина факела и, следовательно, положение зоны максимальных температур могут регулироваться за счет соотношения количества первичного воздуха и газа для кольцевого защитного факела, а также за счет количества газа в центральной и кольцевой струе.

Стабилизация горения защитного факела осуществляется запальной горелкой, которая находится с торца кольцевой камеры, где, кроме первичного воздуха, имеется вторичный воздух, подсасываемый из холодильника, в котором он нагревается до 400...450 °С [1].

Размеры горелочного устройства также оказывают влияние на положение зоны спекания. Так как протяженность печи 90 м, общая длина корпуса горелки составила 4,1 м. С учетом того, что примерно  $\frac{1}{2}$  ее часть ( $\approx 2$  м) находится в рабочем пространстве печи, зона максимальных температур соответственно смещается на это же расстояние. Эскиз печи представлен на рисунке 2.

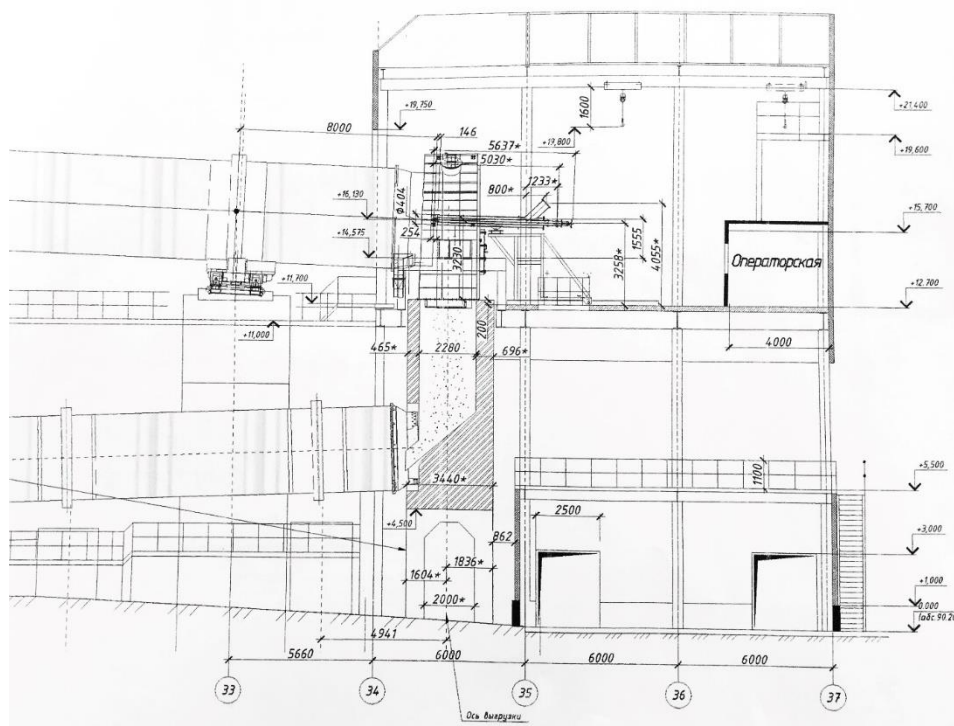


Рис. 2. Эскиз печи

При производстве подобного габаритного оборудования не всегда есть возможность экспериментальной реализации, поэтому одним из возможных путей решения данной проблемы является компьютерное математическое моделирование. На современном этапе развития компьютерных технологий появляется альтернативный вариант при исследовании процессов горения – расчёт в программных комплексах для трёхмерного моделирования гидрогазодинамики, процессов горения и теплообмена. Таким образом специалисты могут детально изучить оборудование и процессы изнутри, повысить эффективность, увеличить срок службы и оптимизировать работу. ANSYS является наиболее известной программной средой, представляющей собой универсальную систему конечно-элементного анализа, предназначенную для автоматизированных инженерных расчётов [2].

Для определения основных показателей работы горелки, а именно распределения температур в факеле, температуры продуктов сгорания, распределения концентраций основных компонентов, было проведено компьютерное моделирование процесса горения с использованием модуля ANSYS CFX.

Перед началом компьютерного расчета необходимо создать твердотельную геометрическую модель рабочих сред в корпусе горелки и в рабочем пространстве печи по исходному чертежу (см. рис. 1). Для этого была использована система трехмерного моделирования КОМПАС-3D.

Далее в программном комплексе ANSYS в выбранном модуле Fluid Flow (CFX) поэтапно выполняется работа с каждым объектом расчетной модели.

С помощью первого компонента ANSYS Design Modeler импортируется ранее созданная геометрическая модель рабочих сред. Ее основное предназначение в программных комплексах инженерного анализа – описание границ расчетной области.

Затем необходимо разбить расчетную область на конечное число элементов, в узлах которых будут находиться значения искомых переменных (скорость, концентрация, температура). Это возможно сделать с помощью различных приложений для генерации сетки. Программная среда ANSYS включает в себя такие сеточные процессоры как:

- ANSYS Meshing;
- ANSYS TurboGrid;
- ANSYS ICEM CFD.

Выбор сеточного процессора будет зависеть от специфики решаемой задачи. В данном случае, для создания сетки был использован универсальный сеточный генератор ANSYS Meshing. Для получения точного решения дополнительно корректировались размеры сетки наиболее ответственных элементов геометрической модели, а также с помощью опции Inflation построены сгущающиеся призматические слои ячеек вблизи выбранных поверхностей.

Следующий этап – предобработка в CFX-Pre. Здесь осуществляется подготовка к моделированию различных процессов гидрогазодинамики.

Благодаря удобному интерфейсу и мощному языку программирования появляется возможность работы со сложными физическими моделями и граничными условиями.

После того, как физический процессор импортировал ранее созданную геометрическую модель с расчетной сеткой, моделируется химическая кинетика. В соответствии с исходными данными из таблицы 1, в CFX-RIF задаются начальные условия для топлива и окислителя, а также состав топливной смеси. Затем необходимо создать материал с типом Reaction Mixture, где также выбирается его агрегатное состояние «gas».

Таблица 1

Химический состав природного газа и условия его сжигания										
Содержание, об. %						$\alpha$	$t_r$ °C	$d_r$ г/м <sup>3</sup>	$t_b$ °C	$\varphi$ %
CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>					
93,3	4,1	0,7	0,2	0,08	1,5	0,75	20	7	20	57,5

Физические модели и тип расчетной области задаются с помощью настроек в Default Domain.

– Модель теплопереноса «Total Energy». Используется для газообразной или жидкой среды и интегрирует уравнение энергии в зависимости от заданного исходного состояния вещества.

– Модель турбулентности «k – Epsilon». При использовании модели записываются два дополнительных уравнения для расчета кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$ . Наиболее часто используется благодаря тому, что дает возможность получить достаточно точные результаты при быстрой сходимости и относительно низким требованиям к вычислительным ресурсам.

– Модель горения «PDF Flamelet». Используется для описания моделировании диффузионного горения с турбулентным течением при использовании встроенных библиотек.

Также в разделе Default Domain во вкладке Boundary задаются граничные условия. В качестве параметров на входе воздушной среды (первичный воздух, подаваемый в горелку) задаются: массовый расход, температура и тип «Oxidizer» (окислитель). Для воздуха, который поступает в печь из холодильника, граничные условия задаются аналогично, за исключением, массового расхода, вместо него вводится значение полного давления. Для природного газа (80 % основная струя и 20 % защитный кольцевой факел) задаются: массовый расход, температура и тип «Fuel» (топливо). На выходе из печи задается значение полного давления.

Следующий этап – запуск решения. Здесь происходит отыскание таких значений параметров в каждой из ячеек, при которых будет достигнута сходимость, а значение невязки будет сведено к минимуму. После завершения расчета будет сохранен общий файл с результатами, где будут находиться все

файлы с интересующими нас параметрами (температура, скорости, концентрации) в определенный момент времени.

ANSYS CFD-Post - программа, которая предназначена для представления, анализа и визуализации результатов, которые получены в процессе решения задачи посредством ANSYS CFX-Solver. Для просмотра результатов в постпроцессоре в схеме проекта Workbench нужно выбрать раздел → *Results* → *Edit*, где откроется окно постпроцессора. С помощью функций Contour Plot (цветной градиентной заливки) возможен просмотр изменения какой-либо физической величины в выбранной плоскости.

Результаты моделирования представлены в виде температурных и газодинамических полей (рис. 3-10):

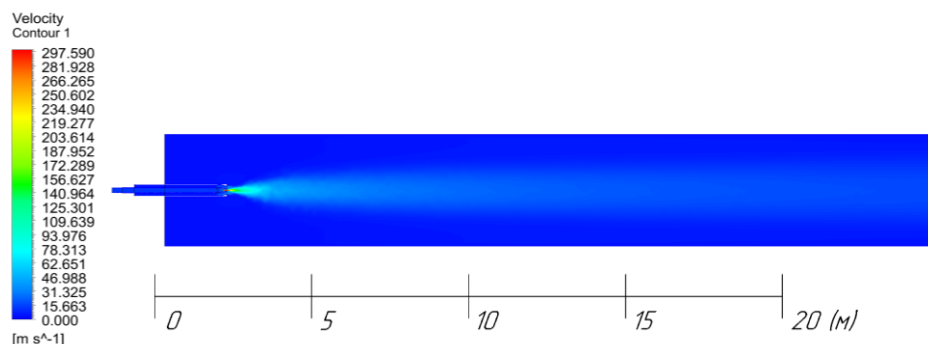


Рис. 3. Поле скоростей

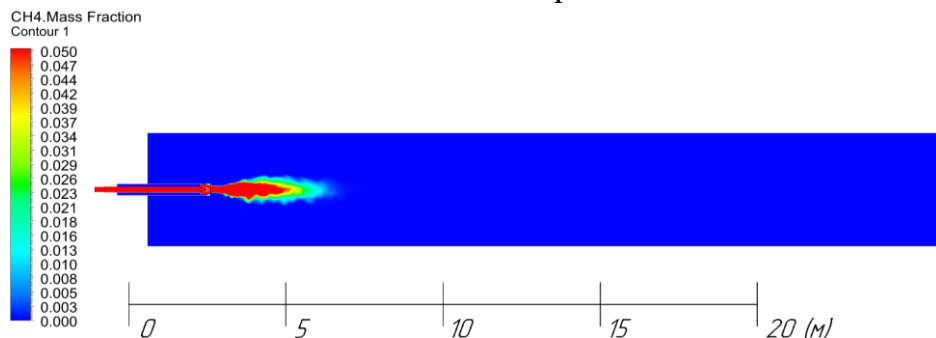


Рис. 4. Распределение концентрации CH<sub>4</sub>

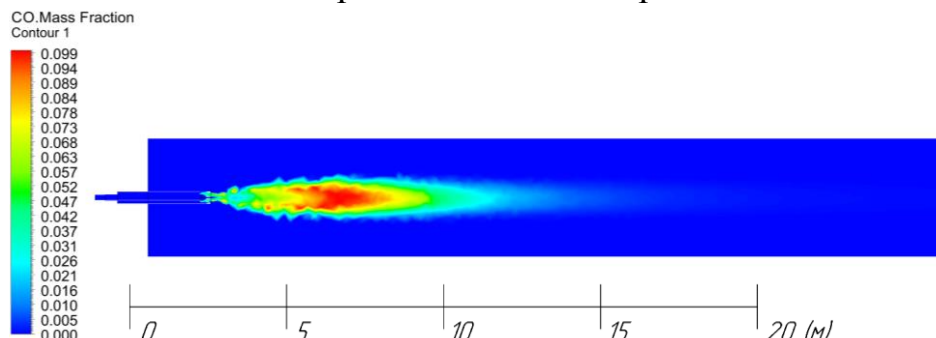


Рис. 5. Распределение концентрации CO

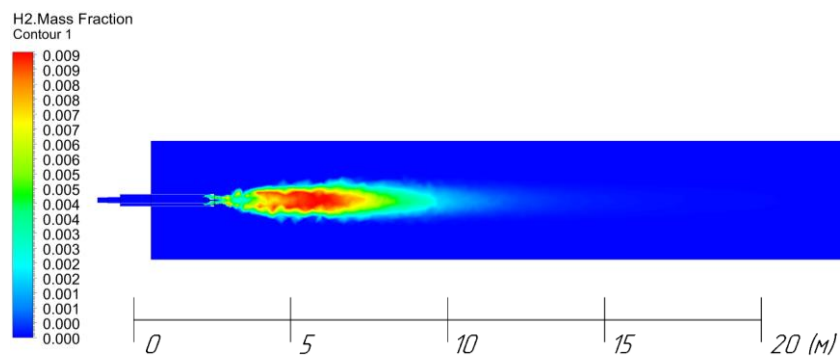


Рис. 6. Распределение концентрации  $H_2$

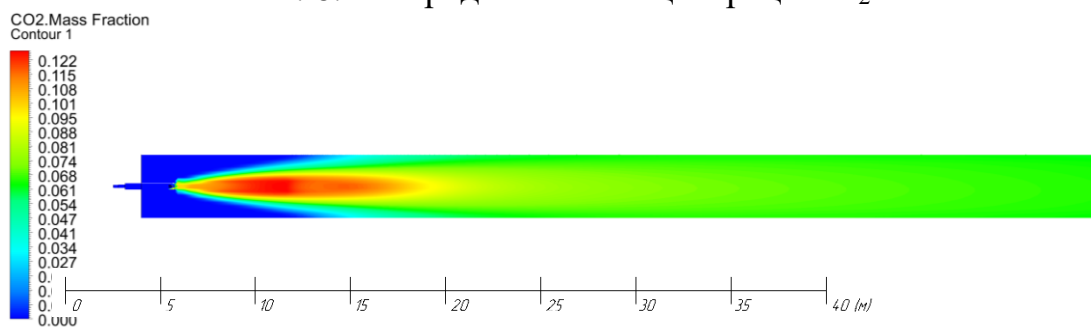


Рис. 7. Распределение концентрации  $CO_2$

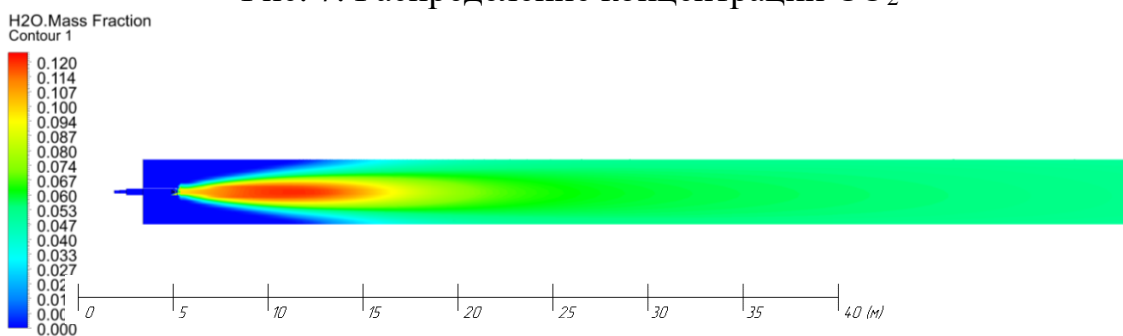


Рис. 8. Распределение концентрации  $H_2O$

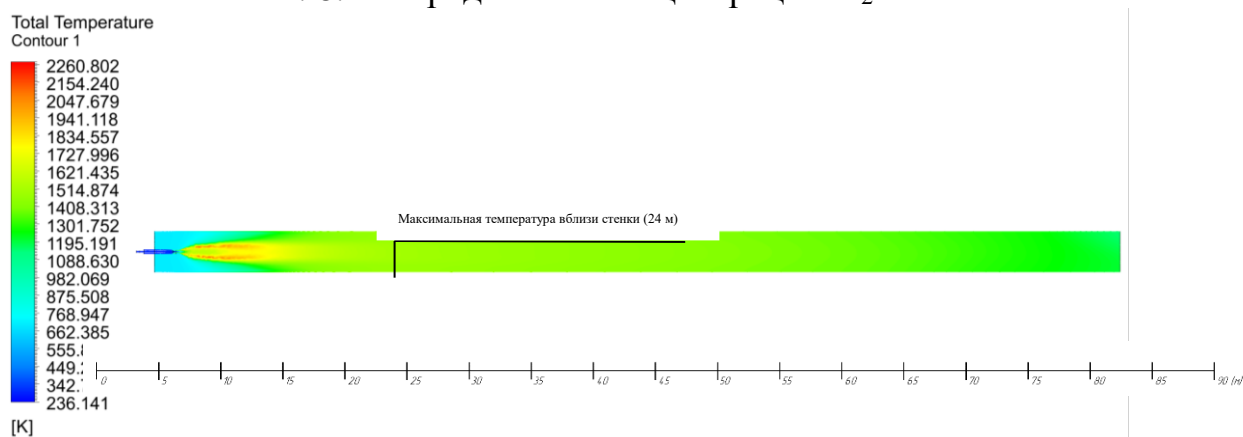


Рис. 9. Распределение температур по длине печи



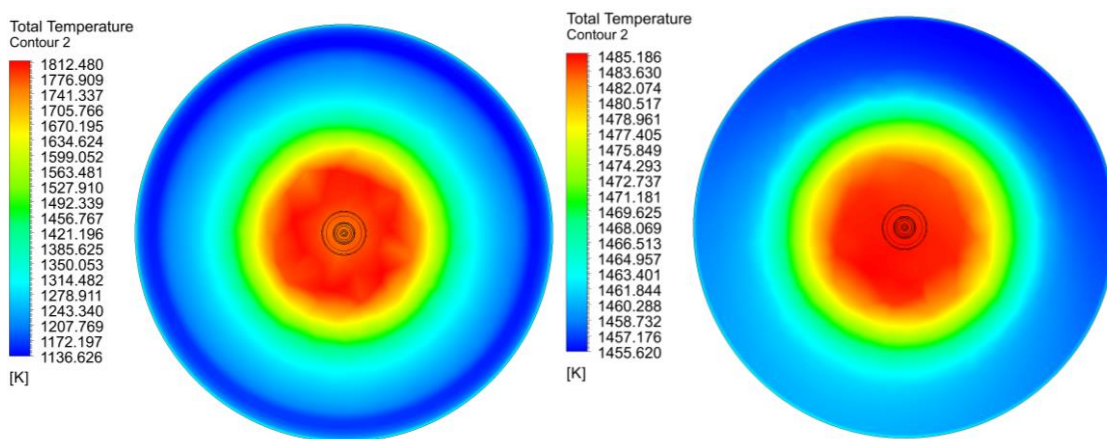


Рис. 10. Распределение температур по диаметру печи на расстоянии 10 м и 24 м от торцевой стенки печи

На рисунке 3 представлено поле скоростей. Максимальная скорость на выходе из сопла горелки составила 298 м/с.

Распределение концентраций основных компонентов горения изображено на рисунках 4-8. Метан сгорает на расстоянии 7 м от среза сопла горелки (рис. 4), в результате чего происходит образование продуктов неполного горения CO и  $H_2$  (рис. 5, 6). Данные компоненты препятствуют преждевременному проникновению воздуха к основной струе газа, что позволяет растянуть факел. Компонент CO сгорает позже всего, поэтому, в нашем случае, по нему определяют длину факела, она составила 333 калибра. Компонент  $H_2$  сгорает на расстоянии 271 калибр. На рисунках 7-8 представлены распределения концентраций  $CO_2$  и  $H_2O$ . Их образование в рабочем пространстве печи происходит вследствие сгорания  $H_2$  и CO.

На рисунках 9-10 изображены поля температур по длине печи и по диаметру печи соответственно. Максимальная температура в факеле составила 1987 °С. Температура вблизи стенки на расстоянии 10 м от начала печи оказалась равной 863 °С, а на расстоянии 24 м от начала печи – 1183 °С.

По результатам компьютерного расчета можно сказать, что поставленные цели были достигнуты. Зону максимальных температур, где происходит спекание, удалось сместить ближе к центральной части печи. Таким образом, разработанное горелочное устройство соответствует всем требованиям технологического процесса и условиям, необходимым для достижения максимально эффективной работы печи.

### Список использованных источников

1. Руководство по эксплуатации горелки с комбинированной системой сжигания топлива. Екатеринбург: ООО Научно-производственная фирма «горелочный центр».
2. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.: ил.